

522,203

10/522203

(12) NACH DEM VEREIN ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
26. Februar 2004 (26.02.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2004/017021 A2

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: G01B 17/00

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2003/002150

(22) Internationales Anmeldedatum:
27. Juni 2003 (27.06.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
102 32 475.1 17. Juli 2002 (17.07.2002) DE
103 27 102.3 12. Juni 2003 (12.06.2003) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von
US): AGFA NDT GMBH [DE/DE]; Robert-Bosch-Str. 3,
50354 Hürth (DE).

(71) Anmelder und

(72) Erfinder: RENZEL, Peter [DE/DE]; Münsterweg 12,
52355 Düren-Birgel (DE).

(74) Anwälte: BAUER, Wulf, Dr. usw.; Lindentallee 43,
D-50968 Köln (DE).

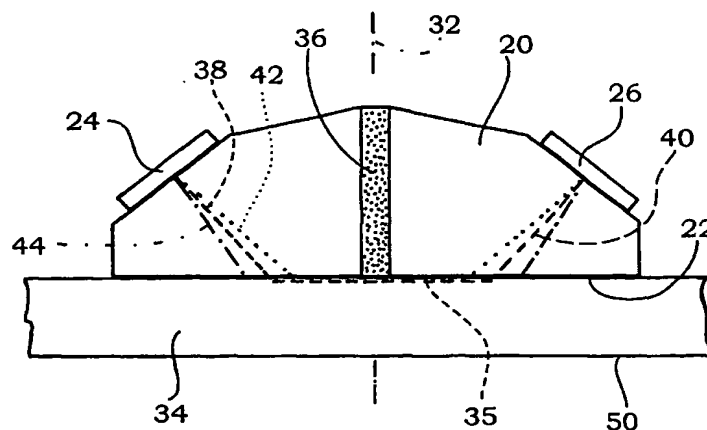
(81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT,
AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR,
CU, CZ, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH,
GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC,
LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW,
MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO-Patent (GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW),
eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR DETERMINING THE SOUND VELOCITY IN A BASIC MATERIAL, PARTICULARLY FOR MEASURING THE THICKNESS OF A WALL

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DER SCHALLGESCHWINDIGKEIT IN EINEM BASISMATERIAL, INSBESONDERE FÜR EINE WANDDICKENMESSUNG



(57) Abstract: Disclosed is a method for determining the sound velocity (C_b) in a basic material, in which an ultrasonic probe comprising a transmitting probe, a receiver transducer, and a forward member is used. Said forward member is provided with a coupling surface, by means of which the probe is coupled to the basic material, and has a sound velocity (C_v). The transmitting probe and the receiver transducer are maligned in an oblique manner from each other and from the coupling surface such that a main transmission direction of the transmitting probe and a main receiving direction of the receiver transducer intersect below the coupling surface. The centers of the transmitting probe and the receiver transducer are located at a distance K from each other and are located at a distance D_v from the coupling surface. According to the inventive method, the transmitting probe generates an ultrasonic pulse which runs through the forward member into the basic material, where said ultrasonic pulse creates a creeping wave, a portion of which arrives at the receiver transducer. The shortest sound traveling time (T_{tot}) is measured and the sound velocity (C_b) within the basic material is determined via the path between the transmitting probe and the receiver transducer, which supplies the shortest total traveling time (T_{tot}).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2004/017021 A2



TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

(57) Zusammenfassung: Das Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b in einem Basismaterial verwendet einen Ultraschallprüfkopf, der einen Sendeschwinger, einen Empfangsschwinger und einen Vorlaufkörper aufweist. Der Vorlaufkörper hat eine Koppelfläche, mit der der Prüfkopf an das Basismaterial angekoppelt wird, und besitzt eine Schallgeschwindigkeit C_v . Der Sendeschwinger und der Empfangsschwinger sind jeweils schräg zueinander und schräg zur Koppelfläche ausgerichtet, sodass eine Hauptsenderichtung des Sendeschwingers und eine Hauptempfangsrichtung des Empfangsschwingers sich unterhalb der Koppelfläche schneiden. Sendeschwinger und Empfangsschwinger haben einen Mittenabstand K voneinander. Der Sendeschwinger und der Empfangsschwinger haben einen Mittenabstand D_v von der Koppelfläche. Bei dem Verfahren wird ein Ultraschallimpuls vom Sendeschwinger erzeugt, läuft durch den Vorlaufkörper in das Basismaterial und ruft dort eine Kriechwelle hervor, von dieser erreicht ein Teil den Empfangsschwinger. Es wird die kürzeste Schalllaufzeit T_{tot} gemessen und die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial bestimmt über denjenigen Weg zwischen Sendeschwinger und Empfangsschwinger, der die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} liefert.

**Bezeichnung: Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit
in einem Basismaterial, insbesondere für eine Wand-
dickenmessung**

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b in einem Basismaterial unter Verwendung eines Ultraschallprüfkopfes, der einen Sendeschwinger, einen Empfangsschwinger und einen Vorlaufkörper aufweist, wobei der Vorlaufkörper a) eine Koppelfläche hat, mit der der Prüfkopf an das Basismaterial ankoppelbar ist, b) den Empfangsschwinger sowie den Sendeschwinger aufnimmt und c) eine Schallgeschwindigkeit C_v hat, der Sendeschwinger und der Empfangsschwinger jeweils schräg zueinander und schräg zur Koppelfläche ausgerichtet sind, so dass eine Hauptsenderichtung des Sendeschwingers und eine Hauptempfangsrichtung des Empfangsschwingers sich unterhalb der Koppelfläche schneiden, Sendeschwinger und Empfangsschwinger einen Mittenabstand K voneinander haben, der Sendeschwinger einen Mittenabstand D_s von der Koppelfläche und der Empfangsschwinger einen Abstand D_e von der Koppelfläche hat, bei welchem Verfahren ein Ultraschallimpuls vom Sendeschwinger erzeugt wird, durch den Vorlaufkörper in das Basismaterial läuft, dort eine Kriechwelle hervorruft und von dieser ein Teil über den Vorlaufkörper den Empfangsschwinger erreicht sowie auf eine entsprechende Vorrichtung.

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b ist Voraussetzung dafür, die Wanddicke des Basismaterials bestimmen zu können. Zwar ist es bekannt, die Wanddicke eines Basismaterials durch Mehrfachreflexion eines Impulses an einer Eintrittsfläche und einer Rückfläche des Basismaterials zu bestimmen, dieses Verfahren setzt aber ausreichend spiegelnde und damit glatte Flächen, insbesondere eine ausreichend glatte Rückfläche voraus, damit es zu mehrfachen Hin- und Herläufen im Basismaterial kommt. Bei rauen Rückflächen lässt sich dieses Verfahren nicht anwenden, vielmehr ist man

auf einen einmaligen Hin- und Herlauf angewiesen. Über die Schallgeschwindigkeit C_b kann dann die Wandstärke ermittelt werden .

Aus US 6,035,717 sind ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Dicke eines beschichteten Basismaterials bekannt. Bei diesem Verfahren wird für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b des Basismaterials zunächst das unbeschichtete Basismaterial gemessen, es wird ein Impuls von einem Sendeschwinger durch den Vorlaufkörper in das Basismaterial eingeschallt, wo eine Kriechwelle erzeugt wird, von der wieder ein Anteil auskoppelt und vom Empfangsschwinger empfangen wird. Insoweit besteht Übereinstimmung mit der Erfindung.

Der Weg dieses Impulses wird gemäß US 6,035,717 nun aber als fest vorgegeben angenommen. Dem Erfinder dieser US-Patentschrift war, so hat es den Anschein, wohl bewusst, dass diese Annahme eines geometrisch festen Weges entlang der Hauptstrahlen gewisse Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b bringt . Er schlägt daher in praktischen Anweisungen vor, die Abstände der beiden Schwinger von der Koppelfläche möglichst gering zu halten. Dadurch wird in der Tat die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit im Basismaterial genauer, anders ausgedrückt wird die Ungenauigkeit verringert. Nun hat aber ein Prüfkopf mit kurzer Schalllaufstrecke des Vorlaufkörpers den Nachteil, dass nur wenig Material des Vorlaufkörpers für die bei jeder praktischen Prüfung stattfindende Abnutzung des Vorlaufkörpers zur Verfügung steht, der Prüfkopf also früher erneuert werden muss, als ein Prüfkopf mit grösserer Vorlaufstrecke.

Hier setzt nun die Erfindung ein. Sie hat es sich zur Aufgabe gemacht, das Verfahren nach der US 6,035,717 A dahingehend weiterzuentwickeln, dass die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial genauer bestimmt wird, dass damit auch präziser die Dicke einer Schicht auf diesem Basismaterial bestimmbar ist, und dass ein Prüfkopf verwendet werden kann, der eine für die

Praxis ausreichend dicke Vorlaufstrecke aufweisen kann.

Gelöst wird diese Aufgabe ausgehend von den eingangs genannten Merkmalen und diese einschließend dadurch, dass die kürzeste Schalllaufzeit T_{tot} gemessen wird und die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial bestimmt wird über denjenigen Weg, der zwischen Sendeschwinger und Empfangsschwinger in Abhängigkeit von der Schallgeschwindigkeit die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} liefert.

Bei diesem Verfahren wird der Umstand berücksichtigt, dass der Weg, den der Impuls durch den Vorlaufkörper, entlang der Oberfläche des Basismaterials (als Oberflächenwelle) und zurück durch den Vorlaufkörper nimmt, neben den vorbekannten Größen K , D_v und C_v beeinflusst wird (K = Mittelpunktsabstand der Kontaktflächen der Schwinger, D_v = Mittelpunktsabstand der Kontaktfläche eines Schwingers von der Koppelfläche) durch die Schallgeschwindigkeit C_b . Ist diese im Vergleich zur Schallgeschwindigkeit C_v im Vorlaufkörper relativ gross, so wird auch der Anteil der Laufstrecke S_b entlang der Oberfläche des Basismaterials relativ gross. Ist dagegen die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial relativ klein, so wird die Laufstrecke S_b der Oberflächenwelle im Basismaterial relativ kurz, die Laufstrecken S_v innerhalb des Vorlaufkörpers werden dagegen länger. Ähnliche Verhältnisse liegen auch bei der Lichtbrechung zwischen unterschiedlichen optischen Medien, beispielsweise Wasser und Luft, vor. Auch in diesem Fall ist der geometrisch kürzeste Weg nicht der zeitlich kürzeste Weg für einen Lichtimpuls.

Die Leistung der Erfindung besteht nun darin, erkannt zu haben, dass das Erfassen der kürzesten Laufzeit T_{tot} des Ultraschallimpulses und ein Optimieren aller möglichen Schalllaufwege zu demjenigen Schalllaufweg hin, der die kürzeste Gesamtlaufzeit als Funktion von C_b liefert, eine präzise Aussage über die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial liefert. Der Erfindung

liegen somit die tatsächlichen Wege zugrunde, die ein Schallimpuls zurücklegt. Sie macht keine Annahmen über den Weg, wie dies in der US 6,035,717 A der Fall ist. Die Fehler dieses vorbekannten Messverfahrens und der entsprechenden Vorrichtung werden daher erfindungsgemäss vermieden.

Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den übrigen Ansprüchen sowie der nun folgenden Beschreibung nicht einschränkend zu verstehender Ausführungsbeispiele der Erfindung, die unter Bezugnahme auf die Zeichnung im folgenden näher erläutert werden, dabei wird auch das erfindungsgemässe Verfahren erläutert. In der Zeichnung zeigen:

Figur 1: Eine prinzipielle Darstellung in Seitenansicht eines Prüfkopfes mit zwei Schwingern, der an ein Basismaterial angekoppelt ist, die einzelnen Teilstrecken des Gesamtweges sind dargestellt,

Figur 2: die Darstellung gemäß Fig. 1 mit eingezeichneten Laufstrecken, Schallgeschwindigkeiten usw.,

Figur 3: eine Darstellung wie Figur 1, jedoch hat nun zusätzlich das Basismaterial eine dünne Schicht (ein Coating), beispielsweise eine Farbe, einen Metallüberzug oder eine Kunststoffbeschichtung, und

Figur 4: eine Darstellung ähnlich Figur 1, jedoch nun mit zwei zusätzlichen Schwingern für eine Wanddickenmessung.

Der in Figur 1 gezeigte Prüfkopf hat einen speziell geformten, im wesentlichen prismatischen Vorlaufkörper 20. Dieser hat eine ebene Koppelfläche 22, auch aktive Fläche genannt und dieser gegenüberliegend Abschrägungen, an denen ein Sendeschwinger 24 bzw. ein Empfangsschwinger 26 gehalten sind, insbesondere aufgekittet sind. Beide Schwinger 24, 26 sind baugleich. Sie sind schräg zueinander und auch schräg zur Koppelfläche 22

angeordnet. Auf diese Anordnung wird im folgenden näher eingegangen.

Eine Mittelsenkrechte, also eine rechtwinklig zur Kontaktfläche des Schwingers mit dem Vorlaufkörper 20 und durch den Mittelpunkt dieser Kontaktfläche des Schwingers verlaufende Linie verläuft in einem bestimmten Winkel zur Koppelfläche 22, dieser Winkel beträgt $(90^\circ - \alpha_v)$ und ist für beide Schwinger 24, 26 gleich. Weiterhin liegen die jeweiligen Mittelsenkrechten in derselben Ebene, nämlich in der Ebene der Fig. 1.

Dies kann auch anders ausgedrückt werden: Die beiden Schwinger 24, 26 sind klappsymmetrisch zu einer Symmetrieebene 32 angeordnet. Sie sind so schräg zur Koppelfläche 22 gestellt, dass in einem Basismaterial 34, an das der Vorlaufkörper 20 über geeignete, ansich bekannte Mittel angekoppelt ist, eine Oberflächenwelle 35 erzeugt wird, worauf noch im einzelnen eingegangen wird.

Eine im wesentlichen entlang der Symmetrieebene 32 vorgesehene Trennschicht 36 sorgt dafür, dass ein direktes Übersprechen (cross talk) zwischen Sendeschwinger 24 und Empfangsschwinger 26 unterbunden wird.

Die angegebenen Mittelsenkrechten fallen üblicherweise mit einem Hauptstrahl, also einem Hauptsendestrahl 38 und einem Hauptempfangsstrahl 40 zusammen.

Die Schallgeschwindigkeit C_v im Vorlaufkörper 20 ist bekannt. Bekannt ist auch der Abstand K zwischen den Flächenmittelpunkten der beiden Schwinger 24, 26. Schliesslich sind der Abstand des Flächenmittelpunktes des Sendeschwingers 24 von der Koppelfläche 22 und der Abstand des Mittelpunktes des Empfangsschwingers 26 von der Koppelfläche 22 bestimmbar und somit bekannt. Aufgrund der Symmetrie haben beide den Wert D_v . Mit Hilfe nur dieser Vorgaben ist es nun möglich, die Schallgeschwindigkeit C_b

im Basismaterial 34 zu bestimmen. In einem weiteren Schritt kann man dann die Dicke, also die Wanddicke D_b des Basismaterials 34 bestimmen.

Wenn die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial 34 etwa so gross ist wie die Schallgeschwindigkeit von Stahl, ist der kürzeste Weg eines Schallimpulses vom Sendeschwinger 24 zum Empfangsschwinger 26 der folgende: Der Impuls läuft entlang des Hauptsendestrahl, dann als Oberflächenwelle 35 im Basismaterial 34 und schliesslich wieder entlang des Hauptempfangsstrahls 40 in den Empfangsschwinger 26. Dieser Weg ist in Fig. 1 gestrichelt eingezeichnet, er verläuft entlang dem Hauptsendestrahl 38 und dem Hauptempfangsstrahl 40.

Ist nun aber die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial 34 kleiner als diejenige von Stahl, so wird der Schallweg möglichst viel Strecke innerhalb des Vorlaufkörpers 20 nutzen, die Länge der Strecke S_b , die durch die Oberflächenwelle 38 im Basismaterial 34 realisiert ist, wird kurz. Dieser Fall ist in Figur 1 durch einen gepunktet dargestellten Schalllaufweg 42 dargestellt.

Ist andersherum die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial grösser als diejenige Stahl, wird die Schallstrecke S_v innerhalb des Vorlaufkörpers 20 kurz zugunsten einer längeren Laufstrecke S_b als Oberflächenwelle 35. Dieser Fall ist in Figur 1 durch den strichpunktierten Schalllaufweg 44 dargestellt.

Zur Vereinfachung der Darstellung ist in Figur 1 lediglich der komplette Schalllaufweg gestrichelt dargestellt, der entlang der Hauptstrahlen 38, 40 verläuft. Man erkennt, dass die Laufstrecke S_b der Oberflächenwelle 35 eine Funktion der Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial 34 ist und zudem von den konstanten Grössen K , C_v und D_v abhängt. Erfindungsgemäss wird die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial 34 über die Optimierung des zugehörigen Schalllaufweges erhalten. Es wird also der Schalllaufweg

zugrunde gelegt, der die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} als Funktion der zu ermittelnden Schallgeschwindigkeit C_b liefert.

Nun nimmt zwar die Amplitude des Schalldrucks ab, je größer der Winkel zum Hauptstrahl ist. Misst man jedoch lediglich das Signal mit kürzester Gesamtlaufzeit T_{tot} , so ist man innerhalb gewisser Grenzen von der Amplitude des Empfangssignals unabhängig. Ideal wäre es, wenn die Schwinger 24, 26 Kugelstrahler wären, dies ist jedoch nicht der Fall. Innerhalb der in der Praxis vorkommenden Schallgeschwindigkeiten macht sich der Einfluss der nicht kugelförmigen Abstrahlung der Schwinger 24, 26 nicht so stark bemerkbar, dass man dies berücksichtigen und speziell auswerten müsste. Die Ausrichtung der Schwinger 24, 26 geschieht idealerweise für einen mittleren Wert der Schallgeschwindigkeit C_b (z.B. für Stahl C_b etwa 6000 m/s).

Der jeweilige Weg, den der Schallimpuls mit der kürzesten Gesamtlaufzeit T_{tot} nimmt, ist somit eine Funktion der Schallgeschwindigkeit C_b und weiterhin abhängig von den bekannten Werten K , D_v und C_v . Bei nicht klappsymmetrischem Aufbau müssen die unterschiedlichen Mittelpunktsentfernungen des Sendeschwingers 24 und des Empfangsschwingers 26 von der Koppelfläche 22 berücksichtigt werden.

Gemäss Figur 1 breitet sich der Ultraschall vom Sendeschwinger 24 über ein erstes Wegstück S_v bis hin zum Basismaterial 34 aus, wofür er die Zeit T_v benötigt. Dort wird eine Kriechwelle 35 erzeugt. Sie hat die in Figur 2 angegebene Länge S_b . Diese Länge wird in der Zeit T_b durchlaufen. Von der Kriechwelle erreicht ein Anteil den Empfangsschwinger 26 über einen Weg, der aufgrund der Symmetrie die Länge S_v hat und für den die Zeit T_v benötigt wird.

Gesucht wird nach der Entfernung S_b zwischen dem Anfangspunkt und dem Endpunkt der Kriechwelle bzw. Oberflächenwelle 35 für longitudinale Wel-

len:

Im folgenden werden allgemeine Formeln aufgestellt für die Schallausbreitung. Dabei wird lediglich die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} beachtet. Um diese zu ermitteln, ist es notwendig, die gesamte Laufstrecke vom Sendeschwinger 24 zum Empfangsschwinger 26 zu berücksichtigen. Als zeitlich konstant jedenfalls für die kurze Dauer der Messung, und auch als vorbekannt werden angenommen K = Mittelpunktsentfernung der Prüfköpfe 24, 26; D_v = Mittelpunktsentfernung der Schwinger 24, 26 von der Koppelfläche 22 und C_v = Schallgeschwindigkeit im Vorlaufkörper.

Ein vom Sendeschwinger 24 ausgesandter Ultraschallimpuls bewirkt im Baismaterial 34 nicht nur eine Oberflächenwelle 35, sondern auch noch weitere Wellen, die longitudinale Oberflächenwelle 35 hat die kürzeste Laufstrecke und auch die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} .

Gemäß Figur 2 gilt:

- (1) $S_b = K - 2K_b;$
- (2) $\tan \alpha_v = \frac{K_b}{D_v}; \rightarrow K_b = D_v \tan \alpha_v;$
- (3) $S_b = K - 2D_v \tan \alpha_v;$ (1/2)

Unterschiedliche Schalllaufwege unterscheiden sich im Eintrittswinkel α_v . Dieser wird erhalten unter der Annahme einer kürzest möglichen Gesamtlaufzeit T_{tot} :

- (4) $T_{tot} = 2T_v + T_b;$
- (5) $C_v = \frac{S_v}{T_v}; \rightarrow T_v = \frac{S_v}{C_v};$
- (6) $C_b = \frac{S_b}{T_b}; \rightarrow T_b = \frac{S_b}{C_b};$
- (7) $\cos \alpha_v = \frac{D_v}{S_v}; \rightarrow S_v = \frac{D_v}{\cos \alpha_v};$

$$(8) \quad T_v = \frac{D_v}{C_v \cos \alpha_v}; \quad (5/7)$$

$$(9) \quad T_{tot} = \frac{2D_v}{C_v \cos \alpha_v} + \frac{K - 2D_v \tan \alpha_v}{C_b}; \quad (4/8/3/6)$$

$$(10) \quad T_{tot} = \frac{K}{C_b} + 2D_v \left(\frac{1}{C_v \cos \alpha_v} - \frac{\tan \alpha_v}{C_b} \right); \quad (9)$$

Gesucht wird ein Minimum der linearen Funktion $T_{tot}(\alpha_v)$. Dies kann beispielsweise über die erste Ableitung nach dem Winkel α_v ermittelt werden, die erste Ableitung muss für einen gewissen Winkel α_v null sein, die zweite Ableitung muss positiv sein:

$$(11) \quad \frac{\partial T_{tot}(\alpha_v)}{\partial \alpha_v} = 0!$$

$$(12) \quad \frac{\partial T_{tot}(\alpha_v)}{\partial \alpha_v} = 2D_v \left(\frac{\sin \alpha_v}{C_v \cos^2 \alpha_v} - \frac{1}{C_b \cos^2 \alpha_v} \right) = 0; \quad (10)$$

$$(13) \quad \frac{\sin \alpha_v}{C_v} - \frac{1}{C_b} = 0; \rightarrow \sin \alpha_v = \frac{C_v}{C_b}; \rightarrow \alpha_v = \arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right); \quad (12)$$

Berücksichtigt man nun (3), erkennt man, dass die Schalllaufstrecke S_b abhängig ist von den beiden Schallgeschwindigkeiten C_v und C_b :

$$(14) \quad S_b = K - 2D_v \tan\left(\arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)\right); \quad (3/12)$$

Da man K , D_v und C_v als konstant annehmen kann, bedeutet dies:

$S_b = f(C_b)$. Die nachfolgende Gleichung (15) beschreibt nun die Abhängigkeit zwischen der gemessenen Gesamtlaufzeit T_{tot} und der zu ermittelnden Schallgeschwindigkeit C_b :

$$(15) \quad T_{tot} = \frac{K}{C_b} + 2D_v \left(\frac{1}{C_v \cos\left(\arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)\right)} - \frac{\tan\left(\arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)\right)}{C_b} \right); \quad (9/12)$$

Damit ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Gesamtlaufzeit T_{tot} und der zu ermittelnden Schallgeschwindigkeit C_b erreicht. Alle anderen

Größen in der Gleichung (15) sind bekannt und konstant.

Somit ist über die Gesamtlaufzeit T_{tot} eindeutig die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial möglich. Mit dieser Erkenntnis kann nun die Wanddicke D_b des Basismaterials bestimmt werden.

Figur 3 zeigt die Anordnung aus den voran gegangenen Figuren, jedoch befindet sich nun zusätzlich eine Schicht 46, ein sogenanntes Coating auf dem Basismaterial 34. Diese Schicht hat eine Dicke D_s . Sie soll über die Schallgeschwindigkeit C_s der Schicht ermittelt werden. Da auch diese unbekannt ist, wird wieder wie zuvor zunächst die Schallgeschwindigkeit ermittelt.

Figur 3 zeigt wiederum lediglich die Schalllaufstrecke mit der kürzesten Gesamtlaufzeit T_{tot} . Es finden zwar noch andere Ausbreitungen statt, beispielsweise wird auch an der der Koppelfläche 22 zu gewandten Fläche des Coatings 46 eine Oberflächenwelle erzeugt, diese soll aber zeitlich nach der Oberflächewelle 35 im Basismaterial 34 eintreffen. Dies bedeutet, dass die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial 34 ausreichend größer als die Schallgeschwindigkeit C_s in der Schicht 46 sein muss. In der Praxis ist dies zumeist erfüllt. Das Basismaterial ist typischerweise ein Metall, die Schallgeschwindigkeiten liegen bei 4500 bis 7000 m/s. Die Schicht 46 ist typischerweise ein Kunststoff, eine Farbe und dergleichen, die Schallgeschwindigkeiten liegen typischerweise bei 2000 bis 3000 m/s. Für den Fall, dass die Schallgeschwindigkeit C_s in der Schicht 46 relativ groß ist, beispielsweise die Schicht ein Metallüberzug auf einem Basismaterial aus Kunststoff ist, die Schicht aus einem Metall höherer Schallgeschwindigkeit als das Basismaterial besteht, z. B. Coating in Ag, Basismaterial in Au, muss entsprechend den voraus gegangenen Überlegungen gearbeitet werden, indem einfach als Basismaterial die Schicht 46 eingesetzt wird.

Im Folgenden wird der in Figur 3 gezeigte Schalllaufweg als kürzester Lauf-

weg betrachtet. Der Eintrittswinkel α_v wird in der Schicht 46 geändert zu α_s . Die Laufstrecken im Volumen der Schicht 46 ergeben sich aus Figur 3, sie betragen S_s . Die zugehörige Schalllaufzeit beträgt T_s .

Für die kürzeste Gesamtlaufzeit gilt dann:

$$(16) \quad T_{tot} = 2(T_v + T_s) + T_b;$$

$$(17) \quad C_v = \frac{S_v}{T_v}; \rightarrow T_v = \frac{S_v}{C_v};$$

$$(18) \quad \cos \alpha_v = \frac{D_v}{S_v}; \rightarrow S_v = \frac{D_v}{\cos \alpha_v};$$

$$(19) \quad T_v = \frac{D_v}{C_v \cos \alpha_v}; \quad (17/18)$$

In der Schicht 46 sind die Verhältnisse entsprechend, für die Schicht 46 gilt:

$$(20) \quad T_s = \frac{D_s}{C_s \cos \alpha_s}; \quad (19)$$

$$(21) \quad T_b = \frac{S_b}{C_b};$$

$$(22) \quad S_b = K - 2(K_b + K_s);$$

$$(23) \quad \tan \alpha_v = \frac{K_s}{D_v}; \rightarrow K_s = D_v \tan \alpha_v;$$

$$(24) \quad \tan \alpha_s = \frac{K_b}{D_s}; \rightarrow K_b = D_s \tan \alpha_s;$$

$$(25) \quad S_b = K - 2(D_s \tan \alpha_s + D_v \tan \alpha_v); \quad (22/23/24)$$

$$(26) \quad T_b = \frac{K - 2(D_s \tan \alpha_s + D_v \tan \alpha_v)}{C_b}; \quad (21/25)$$

Es liegen nun alle Elemente für T_{tot} vor:

$$(27) \quad T_{tot} = 2\left(\frac{D_v}{C_v \cos \alpha_v} + \frac{D_s}{C_s \cos \alpha_s}\right) + \frac{K - 2(D_s \tan \alpha_s + D_v \tan \alpha_v)}{C_b}; \quad (16/19/20/26)$$

$$(28) \quad T_{tot} = \frac{2D_v}{C_v \cos \alpha_v} + \frac{2D_s}{C_s \cos \alpha_s} + \frac{K}{C_b} - \frac{2D_s \tan \alpha_s}{C_b} - \frac{2D_v \tan \alpha_v}{C_b}; \quad (27)$$

$$(29) \quad T_{tot} = \frac{K}{C_b} + 2\left(D_v\left(\frac{1}{C_v \cos \alpha_v} - \frac{\tan \alpha_v}{C_b}\right) + D_s\left(\frac{1}{C_s \cos \alpha_s} - \frac{\tan \alpha_s}{C_b}\right)\right); \quad (28)$$

Die Gesamtlaufzeit T_{tot} ist nun also nicht nur (wie in (15)) eine Funktion des Eintrittswinkels α_v , sondern auch eine Funktion des Eintrittswinkels α_s und lässt sich wie folgt darstellen:

$$(30) \quad T_{tot}(\alpha_v, \alpha_s) = \frac{K}{C_b} + 2(f_1(\alpha_v) + f_2(\alpha_s)); \quad (29)$$

Wenn die Funktion $T_{tot}(\alpha_v, \alpha_s)$ ein Minimum hat, kann dies ebenso wieder über die erste Ableitung nach den beiden Winkeln festgestellt werden. Die ersten Ableitungen müssen 0 sein:

$$(31) \quad \frac{\partial f_1(\alpha_v)}{\partial \alpha_v} = 0!$$

$$(32) \quad \frac{\partial f_2(\alpha_s)}{\partial \alpha_s} = 0!$$

$$(33) \quad \frac{\partial f_1(\alpha_v)}{\partial \alpha_v} = D_v \left(\frac{\sin \alpha_v}{C_v \cos^2 \alpha_v} - \frac{1}{C_b \cos^2 \alpha_v} \right) = 0 \quad (31/29)$$

$$(34) \quad \frac{\sin \alpha_v}{C_v} - \frac{1}{C_b} = 0; \rightarrow \frac{\sin \alpha_v}{C_v} = \frac{1}{C_b}; \rightarrow \sin \alpha_v = \frac{C_v}{C_b}; \rightarrow \alpha_v = \arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right); \quad (33)$$

$$(35) \quad \frac{\partial f_2(\alpha_s)}{\partial \alpha_s} = D_s \left(\frac{\sin \alpha_s}{C_s \cos^2 \alpha_s} - \frac{1}{C_b \cos^2 \alpha_s} \right) = 0 \quad (32/29)$$

$$(36) \quad \frac{\sin \alpha_s}{C_s} - \frac{1}{C_b} = 0; \rightarrow \frac{\sin \alpha_s}{C_s} = \frac{1}{C_b}; \rightarrow \sin \alpha_s = \frac{C_s}{C_b}; \rightarrow \alpha_s = \arcsin\left(\frac{C_s}{C_b}\right); \quad (35)$$

Die Ergebnisse (34) und (36) werden nun in die Gleichung (29) eingesetzt, dies ergibt:

(37)

$$T_{tot} = \frac{K}{C_b} + 2 \left(D_v \left(\frac{1}{C_v \cos \arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)} - \frac{\tan \arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)}{C_b} \right) + D_s \left(\frac{1}{C_s \cos \arcsin\left(\frac{C_s}{C_b}\right)} - \frac{\tan \arcsin\left(\frac{C_s}{C_b}\right)}{C_b} \right) \right);$$

(29/34/36))

Über ein geeignetes Messinstrument, beispielsweise das Gerät DMS 2 der Anmelderin kann die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} gemessen werden. Über sie kann die Dicke D_s der Schicht 46 und/oder kann die Dicke D_b des Basismaterials 34 nun bestimmt werden, wenn die Schallgeschwindigkeiten C_s und C_b bekannt sind. So kann man C_b an einer unbeschichteten Stelle des Prüfkörpers mit Hilfe von (27) bestimmen. Über ein zusätzliches Schwingerpaar für Dickenmessung mit den Schwingern 48, die baugleich sind, wird steil eingeschallt, siehe Figur 4. Es wird ein Rückwandecho erzeugt, dessen Laufzeit um die Laufzeit von D_s reduziert wird. Hieraus errechnet man bei bekannter Schallgeschwindigkeit C_b die Dicke D_b des Basismaterials.

Ein zweites, zeitlich nachfolgendes Echo erhält man von einer Rückwand 50 des Basismaterials 34. Aus der Zeitdifferenz zwischen den beiden Echos und der zuvor gemessenen Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial 34 kann dessen Dicke D_b bestimmt werden. Die Dicke D_b kann aber auch als Differenz dieses Echos der Rückwand 50 zum Eintrittsecho unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeiten, abzüglich der Dicke D_s der Schicht 46 erhalten werden.

Aus der Gleichung (37) werden noch folgende Zusammenhänge erkennbar bzw. deutlich:

- 1) $\frac{C_v}{C_b}$ und $\frac{C_s}{C_b}$ müssen kleiner als 1 sein;
- 2) C_s kann kleiner als C_v sein.

Bezeichnung: Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einem Basismaterial, insbesondere für eine Wand-dickenmessung

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_b in einem Basismaterial (34) unter Verwendung eines Ultraschallprüfkopfes, der einen Sendeschwinger (24), einen Empfangsschwinger (26) und einen Vorlaufkörper (20) aufweist, wobei der Vorlaufkörper (20) a) eine Koppelfläche (22) hat, mit der der Prüfkopf an das Basismaterial (34) ankoppelbar ist, b) den Empfangsschwinger (26) sowie den Sendeschwinger (24) aufnimmt und c) eine Schallgeschwindigkeit C_v hat, der Sendeschwinger (24) und der Empfangsschwinger (26) jeweils schräg zueinander und schräg zur Koppelfläche (22) ausgerichtet sind, sodass eine Hauptsendrichtung des Sendeschwingers (24) und eine Hauptempfangsrichtung des Empfangsschwingers sich unterhalb der Koppelfläche (22) schneiden, Sendeschwinger (24) und Empfangsschwinger (26) einen Mittenabstand K voneinander haben, der Sendeschwinger (24) und der Empfangsschwinger (26) einen Mittenabstand D_v von der Koppelfläche (22) hat, bei welchem Verfahren ein Ultraschallimpuls vom Sendeschwinger (24) erzeugt wird, durch den Vorlaufkörper (20) in das Basismaterial (34) läuft, dort eine Kriechwelle (35) hervorruft und von dieser ein Teil über den Vorlaufkörper (20) den Empfangsschwinger (26) erreicht, die kürzeste Schalllaufzeit T_{tot} gemessen wird und die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial (34) bestimmt wird über denjenigen Weg zwischen Sendeschwinger (24) und Empfangsschwinger, der die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} liefert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass derjenige Weg, der die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} liefert, bestimmt wird durch Aufsummieren der Laufstrecke vom Sendeschwinger (24) zum Basismaterial (34), der Laufstrecke im Basismaterial (34) und der Laufstrecke vom Basismaterial (34) zum Empfangsschwinger (26) und Optimieren dieser Laufstrecken hinsichtlich der kürzesten Gesamtlaufzeit T_{tot} , insbesondere differenzieren nach dem Winkel.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} erhalten wird über

$$T_{tot} = \frac{K}{C_b} + 2Dv \left(\frac{1}{C_v \cos(\arcsin(\frac{C_v}{C_b}))} - \frac{\tan(\arcsin(\frac{C_v}{C_b}))}{C_b} \right).$$

4. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass Sendeschwinger (24) und Empfangsschwinger (26) baugleich sind, dass ihre Hauptstrahlen (38, 40) in derselben Ebene liegen und dass ihre Hauptstrahlen (38, 40) im selben Winkel zur Koppelfläche (22) verlaufen.

5. Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in einem Überzugsmaterial, das sich als Schicht (46) auf dem Basismaterial (34) befindet, bei welchem Verfahren zunächst gemäss Anspruch 1 die Schallgeschwindigkeit C_b im Basismaterial (34) bestimmt wird und anschliessend der Prüfkopf auf die Schicht (46) aufgesetzt wird, die eine Dicke D_s aufweist, ein Ultraschallimpuls vom Sendeschwinger (24) erzeugt wird, der schräg zur Koppelfläche (22) sowohl durch den Vorlaufkörper (20) als auch durch die Schicht (46) hindurchläuft, eine Kriechwelle im Basismaterial (34) hervorruft und von dieser wieder als Teil durch die Schicht (46) und durch den Vorlaufkörper (20), schräg zur Koppelfläche, den Empfangsschwinger (26) erreicht, dass das Empfangssignal mit der kürzesten

Gesamtlaufzeit T_{tot} erfasst und gemessen wird und dass die Schichtdicke D_s der Schicht (46) ermittelt wird aus demjenigen Weg, der die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} liefert.

6. Verfahren zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit C_s in einem Überzugsmaterial nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die kürzeste Gesamtlaufzeit T_{tot} erhalten wird aus

$$T_{tot} = \frac{K}{C_b} + 2 \left(D_v \left(\frac{1}{C_v \cos \arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)} - \frac{\tan \arcsin\left(\frac{C_v}{C_b}\right)}{C_b} \right) + D_s \left(\frac{1}{C_s \cos \arcsin\left(\frac{C_s}{C_b}\right)} - \frac{\tan \arcsin\left(\frac{C_s}{C_b}\right)}{C_b} \right) \right),$$

mit D_s = Dicke der Schicht.

1/2

Fig. 1

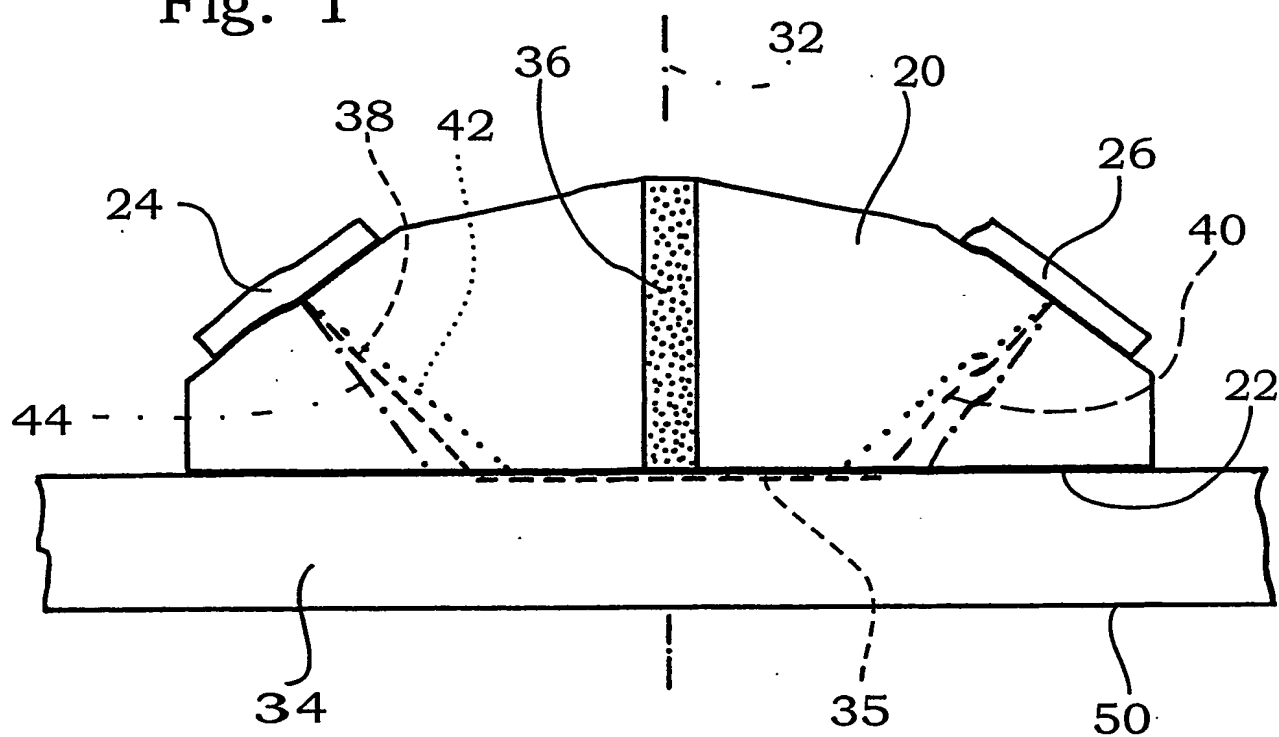


Fig. 2

